



ECHO

Rapport de projet

CESINOVA MF14 – CSPACE 2025



Introduction

Notre association

Nous sommes une association amateur présente au sein de l'école d'ingénieurs du CESI de Bordeaux. Cette association est composée d'étudiants en cursus d'ingénieur, répartis sur différentes années (de la première à la cinquième année). Elle existe depuis maintenant deux ans. Jusqu'à présent, elle a réalisé trois micro-fusées et participé à deux reprises au concours organisé par l'AJSEP et ArianeGroup, terminant deuxième lors de l'un de ces concours.

L'association se structurera autour d'une entité principale, centrée sur la réalisation du CSpace et, à terme, de la fusée expérimentale. Une seconde entité pourra être créée dans le futur pour intégrer de nouveaux membres et se concentrer sur la fabrication de micro-fusées.

Ce document traitera uniquement du projet CSpace 2025, réalisé par les membres de la première équipe, composée de six personnes :

Enzo LÉA	Équipe méca
Eloi VIDAL-SAINT-ANDRÉ	Équipe organisation/communication
Tristan BOYER	Équipe organisation/communication
Grégoire PERRUCHOT ROUXEL	Équipe avionique
Enzo PUIROUX—BARROSO	Équipe avionique
Damien HASCOËT	Équipe méca

Pourquoi nous faisons cette mini fusée

Nous souhaitons participer au CSpace 2026 avec une fusée expérimentale. Cependant, nous n'avons encore jamais réalisé un projet d'une telle envergure ni participé au CSpace. C'est pourquoi nous avons décidé de commencer par une mini-fusée. Celle-ci nous permettra de :

- Nous adapter aux nouvelles contraintes du CSpace (livrables, cahier des charges).
- Mettre en place et optimiser notre organisation.
- Développer et tester les différents éléments de la fusée en amont (avionique, simulation, expérience, etc.) sur un projet plus simple.

Cette première année constituera une étape essentielle pour nous préparer au développement de la fusée expérimentale dès l'année prochaine.

Organisation de l'année

Afin de tester & valider au fur-et-à-mesure les différentes composantes de la mini-fusée, nous nous sommes appuyé sur des micro-fusées, comme nous faisons depuis le début de l'association, ainsi qu'un drone.

Nous visons un lancement environ tous les deux mois. Ces lancements seront, comme les années précédentes, supervisés par Yann Prévot et effectués depuis un site de l'Aérocampus à Latresnes.

Un point compliqué de l'organisation de cette année est le fait que la majeure partie de l'équipe est en semestre académique à l'étranger, y compris lors du CSpace. Le projet à tout de même continué.

Objectifs à valider

Avionique :

Déploiement du système de récupération

Jusqu'à présent, le déploiement du parachute était réalisé par l'expulsion des gaz moteurs. Désormais, conformément au cahier des charges, il devra être commandé par un système électronique. Le travail se sera réparti sur :

- La partie logicielle, pour détecter l'apogée de manière la plus précise et fiable possible.
- La partie électronique/séquenceur, pour concevoir le mécanisme d'éjection du parachute.

La méthode d'éjection du parachute reste à définir et sera un axe prioritaire de recherche.

Enregistrement des données embarquées

L'enregistrement des données embarquées a jusqu'ici été un point faible de nos fusées. Il est impératif de rendre ce système fonctionnel et fiable, en le synchronisant avec le séquenceur. L'architecture technique de ce dispositif reste également à concevoir.

Autonomie électrique

Le cahier des charges impose une contrainte précise d'autonomie. Nous souhaitons expérimenter avec un système de veille ou de faible consommation d'énergie afin d'éviter l'utilisation d'une batterie trop imposante.

Télémesure

Les données principales devront être transmises en temps réel à une station au sol. Cela permettra d'analyser le vol en cas de perte des données embarquées (crash, anomalies, etc.).

Vidéo embarquée

Comme pour nos fusées précédentes, nous souhaitons enregistrer une vidéo embarquée de l'ensemble du vol. Cette année, nous aimerions également expérimenter avec le traitement et l'analyse d'image en temps réel à partir de la fusée, notamment à travers de méthodes comme l'analyse de flux optique.

Mécanique :

Système de récupération

Nous devons développer un système mécanique fiable et efficace pour l'éjection du parachute. Ce système devra répondre aux exigences de robustesse et de précision imposées par le cahier des charges.

Résistance structurelle de la fusée

La structure globale de la fusée devra être rigidifiée par rapport à nos modèles précédents. Plusieurs points seront particulièrement étudiés :

- Structure globale : La fusée devra être dimensionnée en fonction de ses nouvelles caractéristiques et garantir une flèche adaptée pour assurer la stabilité en vol.
- Ailerons : Ils devront être renforcés afin de réussir les tests de résistance du cahier des charges. Nous travaillerons également sur leur système de fixation pour permettre une attache rapide, solide et efficace.
- Tenue du moteur : Le bloc moteur devra être conçu pour maintenir le moteur fermement dans toutes les directions. Il pourrait également intégrer le système de fixation des ailerons pour une structure optimisée.
- Tenue avionique : Les composants électroniques devront être fixés de manière rigide tout en intégrant des éléments capables d'absorber les chocs afin de protéger l'avionique pendant les phases critiques du vol.

Démontabilité de la fusée

Nous visons une grande démontabilité de la fusée pour faciliter son assemblage, son entretien et son transport. Cette caractéristique sera rendue possible grâce à l'utilisation de pièces sur mesure fabriquées en impression 3D.

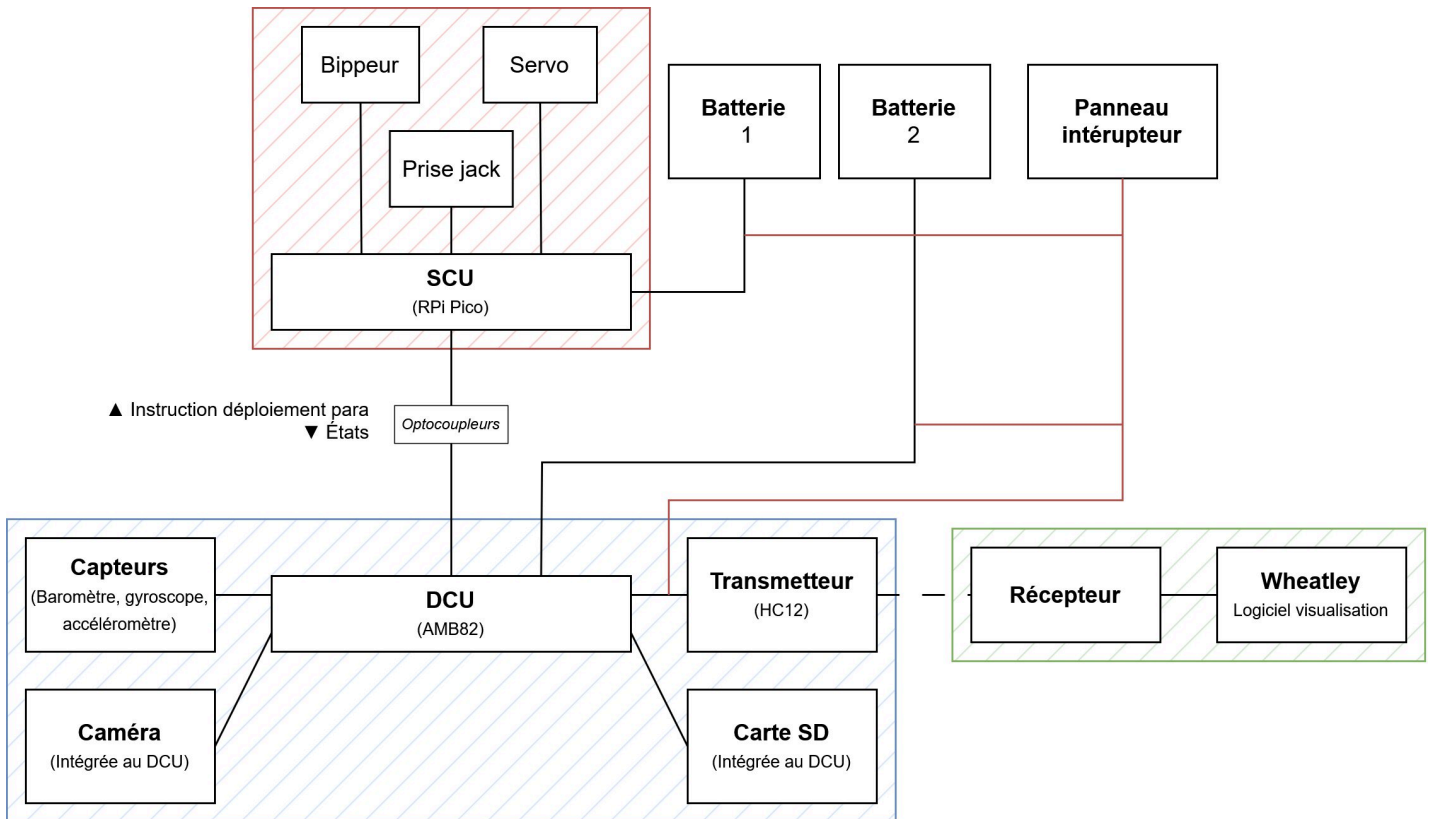
Ce travail global sur la structure, les systèmes et la modularité garantira une fusée performante, robuste et conforme aux exigences du projet.

Réalisation des systèmes

Architecture globale avionique

Le terme « ordinateur de bord » abrégé par « **OBC** » (On-Board Computer) se rapporte à toute l'électronique embarquée de la fusée, composée du séquenceur (abrégé par

SCU, « Sequence Control Unit ») et l'ordinateur d'acquisition de données (abrégé par **DCU**, « Data Control Unit »).



SCU – Séquenceur

Le séquenceur est le contrôleur de vie de la fusée. Il contrôle l'ouverture du parachute, le buzzer de localisation et la prise jack de détection de décollage.

DCU – Ordinateur d'acquisition de données

Le DCU est chargé de récolter les données de différents capteurs (baromètre, accéléromètre, gyroscope) de les stocker sur une carte SD et de les transmettre via télémesure, d'enregistrer une vidéo embarquée et d'envoyer une instruction de déploiement de parachute une fois l'apogée atteinte.

Logiciel

L'entièreté du code est écrit en C++ avec le framework Arduino.

SCU – Séquenceur

Le SEQ à 4 états possibles :

État	Description	Déclencheur prochain état
Standby	Servo contrôlé par interrupteur	Interrupteur « arm » activé
Armed	Servo fermé	Décollage

		(prise jack débranchée)
Ascent	Minuteur apogée lancé	Apogée (minuteur ou instruction DCU)
Descent	Servo verrouillé position ouverte Minuteur atterrissage lancé	Atterri (minuteur)
Landed		

Lors qu'il est mit sous tension, la prise jack doit être branchée, et la trappe du parachute en place.

Tout le long, le SCU envoi à intervalle régulier un signal vers le DCU pour signaler qu'il est opérationnel.

Le servo reste verrouillé en position fermée tant que l'interrupteur d'armement est désactivé.

Le SCU attend alors la déconnexion de la prise jack, signifiant le décollage. Il envoi alors un signal vers le DCU, et lance alors le premier minuteur, réglé sur le temps d'apogée des simulations.

Une fois l'apogée atteinte, soit car le minuteur est terminé, soit car une instruction d'apogée a été reçu du DCU, le servo est alors ouvert pour déployer le parachute, un signal est envoyé vers le DCU, et le second minuteur est lancé.

Une fois le sol atteint (second minuteur terminé), un signal est a nouveau envoyé vers le DCU.

Chaque mode à une signature sonore spécifique. Cela permet d'identifier le mode actuel ainsi que de retrouver la fusée lorsqu'elle a atterri.

Mode	Signature sonore
Standby	1 bip court, 5 secondes de silence
Armed	1 bip court, 1.5 seconde de silence
Ascent	1 bip long, 2 secondes de silence
Descent	1 bip court, 0.1s de silence
Landed	1 bip long, 0.1s de silence

DCU – Ordinateur d'acquisition de données

Le DCU à 6 états possibles, dont 5 partagés avec le SCU :

État	Description	Déclencheur prochain état
Init	Initialisation capteurs, caméra, carte SD Auto-tests capteurs, caméra, carte SD Calibration capteurs	Quand toutes les actions sont terminés
Standby	Envoi des données par TM à basse fréquence Pas d'enregistrement vidéo & données	Interrupteur actionné (signal du SCU reçu)
Armed	Envoi des données par TM à haute fréquence	Décollage (signal du SCU reçu)

	Enregistrement vidéo & données	
Ascent	Envoi des données par TM à haute fréquence Enregistrement vidéo & données Envoi instruction apogée vers SCU	Apogée (signal du SCU reçu)
Descent	Envoi des données par TM à haute fréquence Enregistrement vidéo & données	Atterri (signal du SCU reçu)
Landed	Envoi des données par TM à basse fréquence Enregistrement données à basse fréquence	

Afin d'économiser de l'énergie, en mode « standby » la caméra est désactivée, l'enregistrement des données est désactivé, la collecte et l'envoi des données se fait à basse fréquence.

Électronique

Le circuit a été conçu sur le logiciel Fritzing, et monté sur une plaque de soudage perforée.

SCU – Séquenceur

Le séquenceur repose sur un microcontrôleur Raspberry Pi Pico. Nous l'avons choisi car il est très polyvalent, simple à utiliser, peu coûteux, et nous le connaissons bien, c'est celui que nous utilisons sur nos micro-fusées depuis 2023.

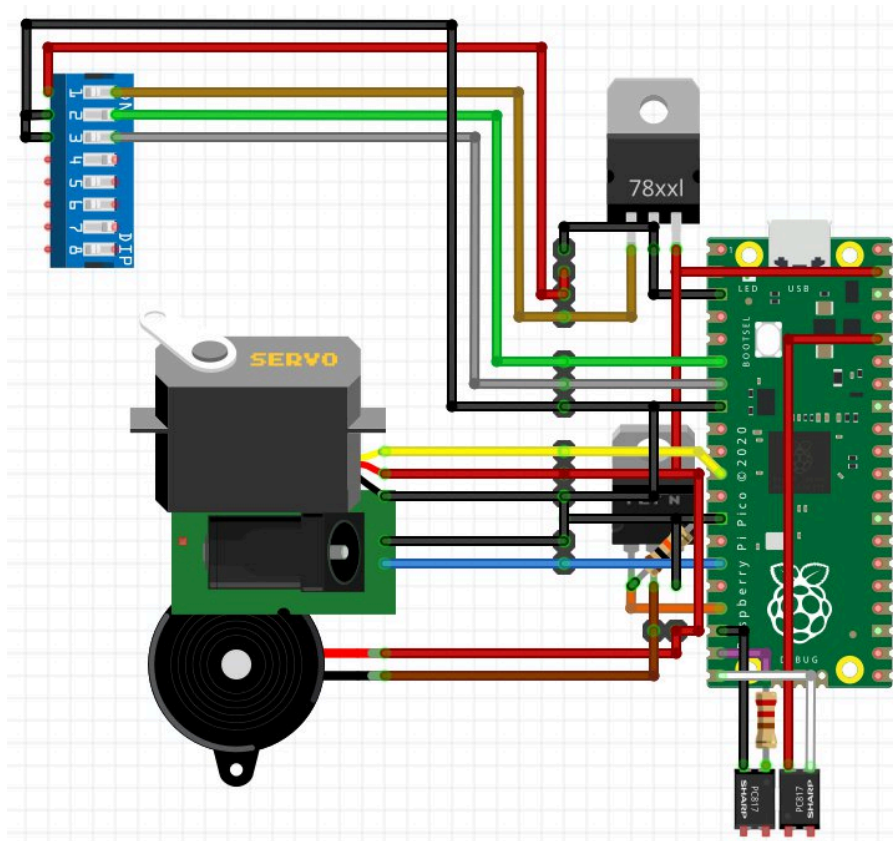
Sa circuiterie doit permettre d'interfacer simplement les éléments suivants à l'aide de broches :

Élément	Broche
Alimentation	Positif
	Négatif
Interrupteur mise sous tension	Positif
	Signal
Interrupteurs servo/armement	Négatif
	Interrupteur servo
	Interrupteur armement
Servo	Positif
	Négatif
	Signal
Prise jack	Négatif
	Signal
Buzzer	Négatif
	Positif

Le tout est alimenté par une pile 9v, dont la tension est abaissée et régulée à 5v grâce à un régulateur LM7805.

Afin d'éviter de tirer une tension trop importante depuis le RPi, l'alimentation du servo est directement reliée au régulateur, et le buzzer est contrôlé par un mosfet IRL540N, lui aussi directement alimenté par le régulateur.

Le SCU a besoin de communiquer tout au long de son fonctionnement son état actuel au DCU, et vice-versa, tout en passant par des optocoupleurs afin de garantir l'isolation électrique. Pour cela, l'émetteur émet un signal PWM (Pulse Width Modulation), le receveur démodule ce signal (calcul du temps ou le signal est « haut »). Ce temps correspond à une valeur précise correspondant à un mode précis. Par exemple, si le signal « haut » reçu par le DCU dure 50ms, il comprend que le SCU est en mode standby.



DCU – Ordinateur d'acquisition de données

Le DCU, lui, repose sur un microcontrôleur Realtek AMB82. Le choix de ce microcontrôleur provient de sa capacité à enregistrer et traiter des vidéos hautes qualités en temps réel, tout en étant simple à utiliser (format plus petit qu'un Arduino Uno, programmable avec le framework Arduino) et très basse consommation. Enregistrer une vidéo est l'un des grands objectifs de nos micro fusées ainsi que cette mini fusée, et nous permet d'envisager une expérience utilisant une analyse de vidéo en temps réel pour notre fusée expérimentale l'année prochaine.

Il a pour but d'enregistrer une vidéo embarquée, enregistrer et envoyer les données provenant des capteurs (baromètre, gyroscope, centrale inertielle), et envoyer un signal au SCU lorsque l'altitude d'apogée est atteinte.

Les capteurs sont concentrés sur un seul PCB (AltIMU-10 v6) et communiquent sur un bus I²C commun :

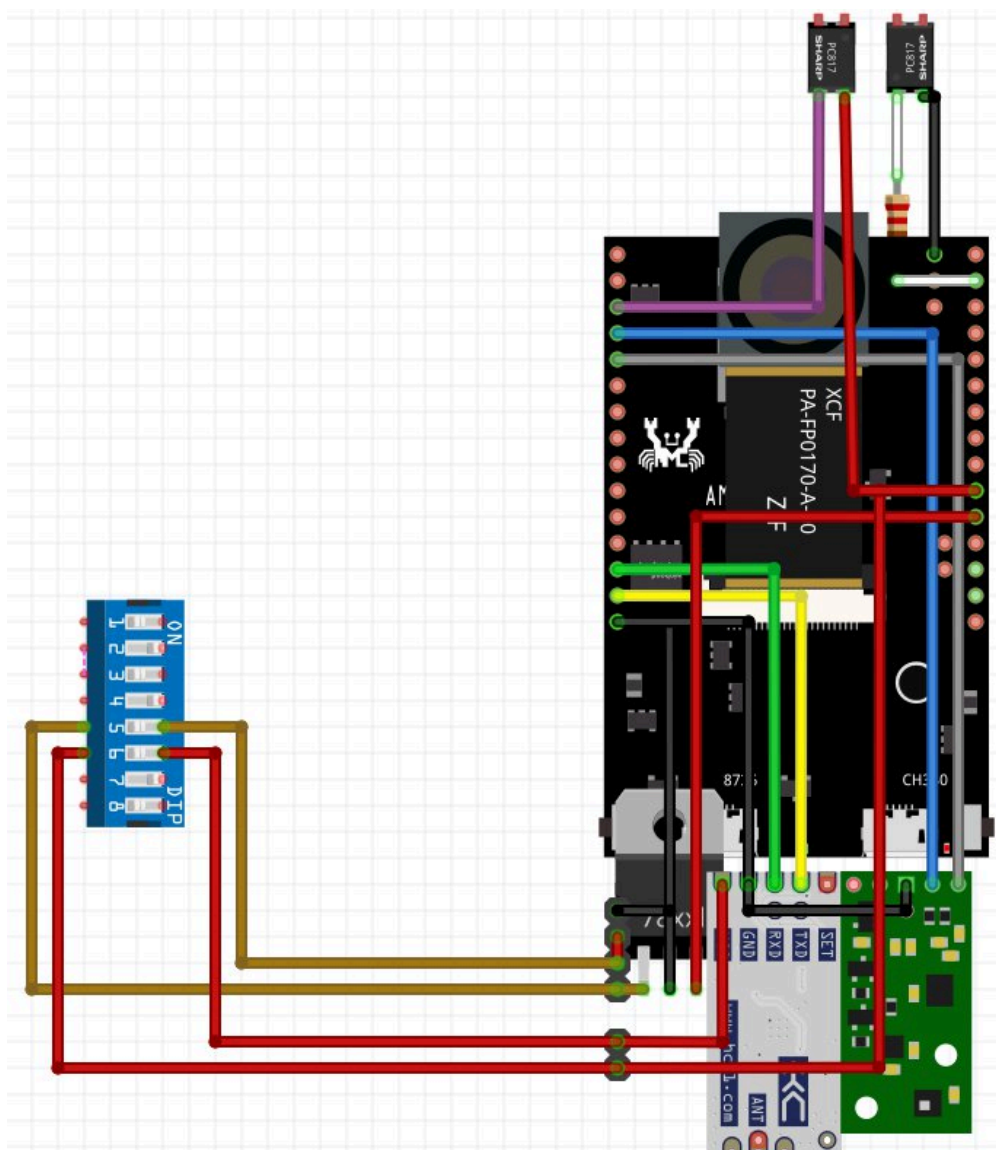
- Centrale inertielle (IMU) : LSM6DSO
- Gyroscope magnétique : LIS3MDL
- Baromètre : LPS22DF

La télémétrie est transmise à l'aide d'un module HC12, communiquant avec une liaison UART sur une fréquence de 433MHz et une puissance de 10mW.

Les données et la vidéo sont enregistrés sur une carte SD, dont le lecteur est intégrée au microcontrôleur.

Il est lui aussi alimenté par une pile 9v, régulé par un régulateur linéaire LM7805.

Des broches sont aussi présentes, servant à mettre sous tension le microcontrôleur et le module télémétrie.



Analyse de risques

Matrice des risques par échecs composant

Le tableau suivant résumé la criticité de la situation si un ou deux composants sont en échec.

	Rien	DCU	SCU	Parachute* BARO	IMU	GYR	TM	CAM	BUZ
Rien									
DCU									
SCU									
Parachute*									
BARO									
IMU									
GYR									
TM									
CAM									
BUZ									

*: Le parachute concerne le système entier: parachute, servo, trape

Niveau	Nomination	Conséquence(s)
	Comportement nominal	Aucun
	Problème mineur	Aucun ou négligeable
	Problème majeur	Comportement sub-optimal, expérience compromise
	Catastrophe	Vol balistique, fusée détruite

Tableaux d'action en cas d'échec

Ce tableau résume les actions prises par le système embarqué de la fusée ainsi que celles qui doivent être prises par l'équipe au sol.

Composant en échec	Conséquence(s)	Action côté fusée	Action côté sol
DCU	Plus de données, plus de détection d'altitude	SEQ: ne se fier qu'au minuteur, ne pas attendre instruction de déploiement, réinitialiser si possible	Aucun
SCU	Plus aucun contrôle, vol balistique	MCU: Envoyer continuellement instruction déploiement parachute si minuteur ou altitude seuil dépassé	Alterter responsables CSpace d'un vol balistique
Parachute*	Plus aucun contrôle, vol balistique	Aucune, aucun moyen de savoir	Alterter responsables CSpace d'un vol balistique
BARO	Calcul d'altitude très imprécis	MCU: Ne pas envoyer d'instruction de déploiement	Aucun
IMU	Calcul d'altitude légèrement imprécis	MCU: Calculer l'altitude qu'à partir de la pression	Aucun
GYR	Aucun	Aucune	Aucun
TM	Pas de données transmises	Aucune	Ré-orienter l'antenne
CAM	Pas de vidéo	Réinitialiser la caméra & capture	Aucun
BUZ	Pas de localisation sonore	Aucune, aucun moyen de savoir	Aucun, aucun moyen de savoir

Structure de la fusée

La conception mécanique de la mini-fusée repose sur une structure modulaire, légère et démontable, pensée pour être facilement fabriquée, assemblée et maintenue. Chaque partie a été modélisée sous Fusion 360, en respectant les contraintes du règlement du C'Space ainsi que nos propres objectifs de robustesse et de clarté interne. Ci-dessous sont détaillés les principaux blocs de la structure, les choix techniques effectués et les arguments qui les motivent.

1. Enveloppe externe – Corps principal

Le corps de la fusée est constitué d'un tube en PVC de 800 mm de long et de 63 mm de diamètre. Ce matériau a été retenu pour son prix, sa disponibilité et sa rigidité suffisante à l'échelle de notre fusée. Le tube est usiné avec plusieurs encoches spécifiques :

- Encoche caméra : Un évidement latéral, recouvert d'un capot profilé imprimé en 3D, permet l'intégration d'une caméra sans perturber de manière significative l'aérodynamisme.
- Encoche trappe parachute : Un évidement plus important accueille la trappe de libération du parachute, intégrée dans la paroi. Elle est retenue mécaniquement et sera libérée par un système d'éjection électronique.

Ces ouvertures sont stratégiquement positionnées pour ne pas fragiliser la structure globale, tout en assurant un accès direct aux composants critiques.

Structure interne – Squelette modulaire

À l'intérieur du tube, une structure longitudinale composée de deux tiges filetées traverse toute la fusée. Ces tiges maintiennent en place différents paliers circulaires découpés en bois au laser. L'ensemble constitue un squelette léger et rigide qui permet :

- Une compartimentation claire (informatique / parachute / propulsion).
- Une fixation simple des composants internes.
- Une démontabilité rapide via des écrous.

L'utilisation de paliers en bois permet d'obtenir des pièces légères, facilement usinables à l'aide de la découpeuse laser, tout en assurant une rigidité satisfaisante pour nos contraintes mécaniques.

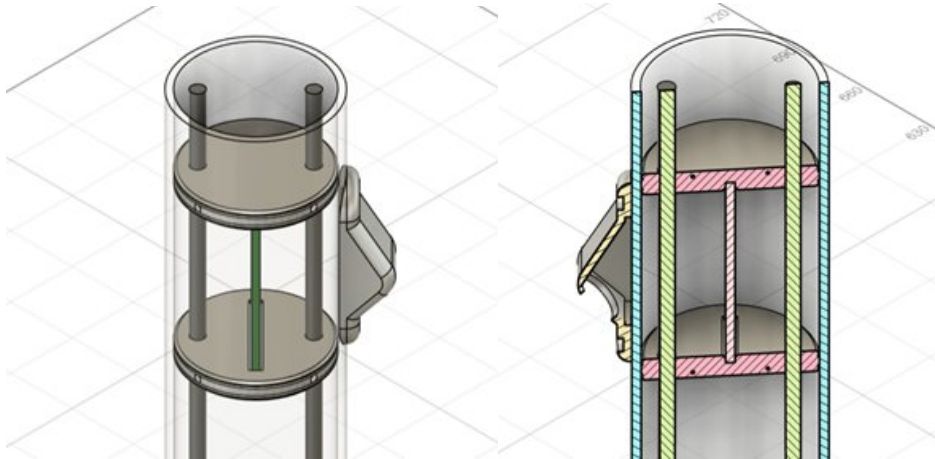
Bloc supérieur – Ogive et avionique

L'ogive est fixée au reste de la structure par des vis traversant à la fois l'enveloppe en PVC, le sommet du palier supérieur et la base de l'ogive. Ce mode de fixation présente deux avantages :

- Il verrouille mécaniquement l'ogive pendant le vol.
- Il sert de premier point d'ancrage au squelette interne.



Juste sous l'ogive se trouve le bloc informatique, composé d'une plaque électronique maintenue entre deux paliers en bois spécialement conçus avec des évidements rectangulaires. Ces fentes permettent de verrouiller la carte électronique sans visserie supplémentaire, réduisant le poids et les vibrations, tout en assurant un bon maintien en vol.



Bloc central – Compartiment parachute

Le compartiment parachute est isolé du reste de la structure par deux paliers circulaires (supérieur et inférieur), montés sur les mêmes tiges filetées. Le parachute est maintenu replié dans cette cavité, et des élastiques sont positionnés entre les tiges pour faciliter sa libération en évitant qu'il ne reste bloqué à l'ouverture.

La trappe latérale découpée dans le tube PVC est bloquée mécaniquement d'un côté, et libérée de l'autre par un système électronique d'éjection, qui interviendra une fois l'apogée atteinte.

Ce système compartimenté permet d'éviter tout contact entre l'électronique et les gaz chauds du moteur, tout en facilitant le pliage et le positionnement du parachute pendant la phase de préparation.

Bloc inférieur – Propulsion et ailerons

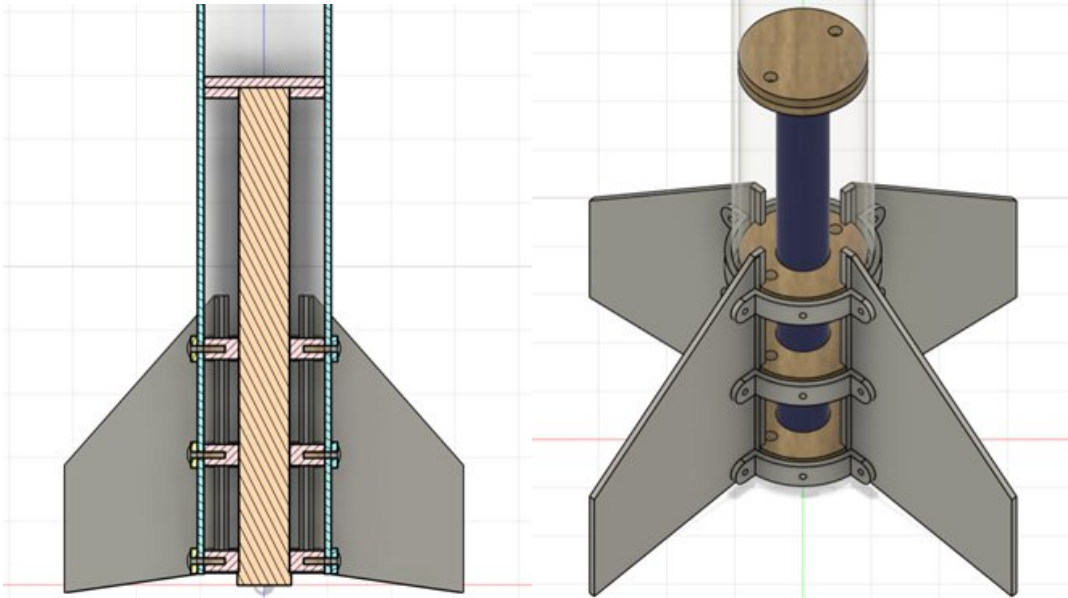
Le bloc moteur est composé de quatre paliers circulaires en bois percés en leur centre pour accueillir le moteur Pandora. Ces paliers jouent un double rôle :

- Ils calent axialement et radialement le moteur (le palier supérieur comporte un évidement à la forme exacte du moteur).
- Ils servent de base de fixation pour les ailerons.

Autour de chaque palier se trouvent quatre trous régulièrement répartis permettant la fixation de bagues imprimées en 3D (PC). Ces bagues maintiennent les ailerons et sont elles-mêmes vissées à travers le PVC et les paliers, assurant ainsi un maintien en trois points pour chaque aileron. Entre chaque paire de trous, des fentes permettent un calage précis des ailerons dans les paliers.

L'ensemble de ce montage a été conçu pour :

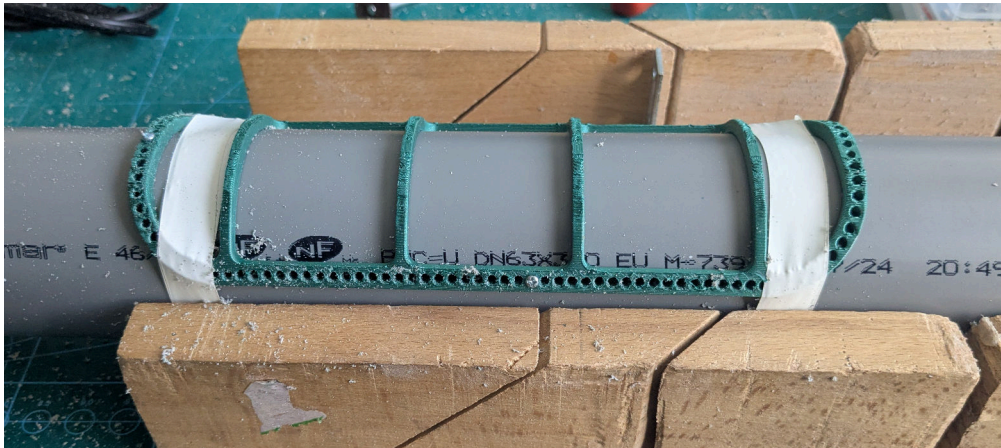
- Garantir la résistance mécanique des ailerons lors du vol.
- Offrir une fixation rigide et reproductible.
- Offrir un second point d'ancrage pour la structure interne, fermant ainsi la cage de compression du squelette de la fusée.



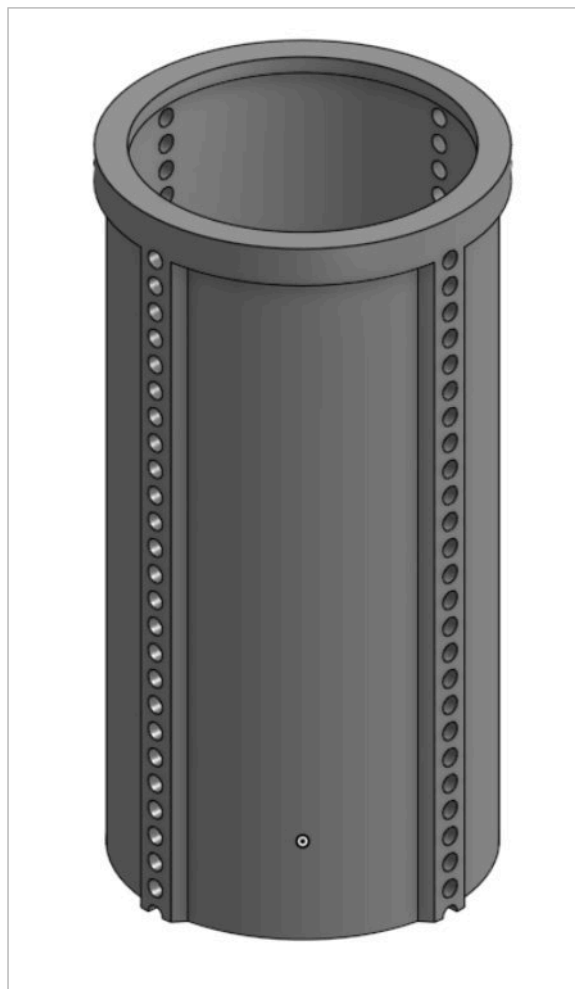
Fabrication

Une des grandes difficultés rencontrés lors de la fabrication de la fusée était l'usinage du tube PVC, notamment la trappe et les fentes d'ailerons. Les tubes PVC utilisés (tuyaux de canalisation) sont très épais et donc compliqué à travailler. Les essais réalisés à la dremel on données des découpes très sales laissant passer l'air.

Finalement, la solution trouvée repose sur des gabarits de découpe imprimés en 3D. Ces gabarits sont composés de trous suivant le trait de découpe afin d'être percés simplement avec une perceuse. A chaque fois, deux gabarits était imprimés, avec les trous du second qui sont décalés. De cette façon, les trous du second gabarit permet de retirer la matière restante entre les trous du premier gabarit.



Gabarit de découpe de trappe



Gabarit de découpe d'ailerons

Cette technique a permis d'obtenir des découpes très propres et très précises. Elle peut être appliquée à n'importe quelle forme et n'importe quel type de tube. C'est toutefois plutôt compliqué à modéliser.

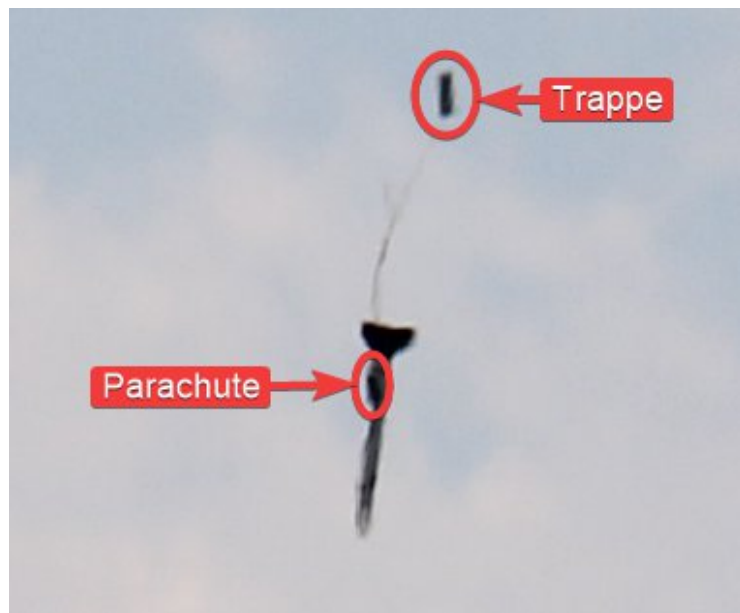
Résultats

Lors du CSpace, notre fusée avait acquis un important retard. La trappe n'était pas imprimée, les fentes d'ailerons n'étaient pas percés. Tout cela implique surtout qu'aucune intégration complète n'avait encore été réalisée.

Nous avons eu la chance de pouvoir venir en voiture, nous permettant d'apporter beaucoup de matériel, notamment deux imprimantes 3D.

Notre fusée fut finalement qualifiée le jeudi 9 juillet, et nous avons été appelé en ZAS le lendemain matin.

L'ascension fut nominale, mais le parachute ne s'est pas déployé. Sur les photos suivantes, fournies par Cyril du club CESIAERO, nous pouvons voir la fusée en descente, avec la trappe bien libérée mais le parachute qui semble à moitié sorti.



Notre théorie est que l'une des suspente s'est coincé derrière le ressort de trappe ou l'axe du servo. Ce problème est survenu lors d'un vol simulé, mais nous avons mit la faute sur un mauvais pliage du parachute.



Nous avons retrouvé les suspentes du parachute emmêlées, sûrement du à la trappe qui s'enroulait dans le vent.

La fusée était enfoncé de ~30cm dans le sol. Du fait de l'inertie, la structure interne d'est désolidarisé du fuselage et à transpercé l'ogive.











